
**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ МЕХАНИКА.
ДИАГНОСТИКА ИСПЫТАНИЯ**

УДК 621.891

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НАГРЕВА СМАЗОЧНОГО СЛОЯ ПРИ ТРЕНИИ© 2022 г. А. Ю. Албагачиев¹, А. Н. Михеев¹, М. А. Тананов¹, А. Б. Тохметова^{1,*}¹Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия

*e-mail: aygerim.tokhmetova@mail.ru

Поступила в редакцию 04.02.2022 г.

После доработки 15.05.2022 г.

Принята к публикации 21.06.2022 г.

В статье рассмотрены экспериментальные и теоретические исследования температуры нагрева смазочного слоя между трущимися поверхностями. Экспериментальное исследование определения температуры смазочного слоя выполнялось на универсальной машине трения УМТ-1.

Ключевые слова: моторное масло, температура смазочного слоя, коэффициент трения

DOI: 10.31857/S0235711922050029

Проблема повышения надежности и долговечности узлов трения в машинах всегда была серьезной проблемой в современной инженерии [1–6]. При трении 85–90% механической энергии превращается в теплоту [7–9]. Главным фактором для оценки работоспособности узлов трения является температурное состояние фрикционного контакта. Теплота, генерируемая в зоне контакта, распределяется между сопряженными телами и окружающей средой [10]. Целью исследования является определение температуры нагрева зоны контакта твердых тел при трении.

Материалы и методы. Трибологические испытания проводились на универсальной машине трения УМТ-1 (рис. 1) [11]. Объектом исследования является моторное масло Mobil Ultra 10W-40. В качестве образцов в виде колец с наружным диаметром 28 мм, внутренним диаметром 20 мм, высотой 15 мм (рис. 2) использовались латунь и нержавеющая сталь 12X18H10T.

В торце неподвижного образца были просверлены два отверстия диаметром 2 мм для датчиков температуры и давления. Нормальная сила, приложенная к неподвижному образцу, составляла 200–500 Н. Полость, между образцами, была заполнена смазкой.

Регистрация и обработка экспериментальных данных проводилась с использованием измерительной системы, состоящей из датчика температуры, датчика частоты вращения шпинделя и микроконтроллера, данные которых отражались в персональном компьютере (ПЭВМ) (рис. 3).

Вычисления действительного значения температуры проводили при помощи микроконтроллера с использованием данных от инфракрасного датчика, датчика температуры корпуса измерителя и тарифовочных таблиц, записанных в постоянной памяти (ПЗУ). Значения температуры и частоты вращения с метками времени передаются на компьютер, где обрабатываются программой составленной в среде LabView.

Для измерения температуры слоя смазки, независимо от температур образцов, применен инфракрасный бесконтактный измеритель температуры на основе датчика



Рис. 1. Универсальная машина трения УМТ-1.

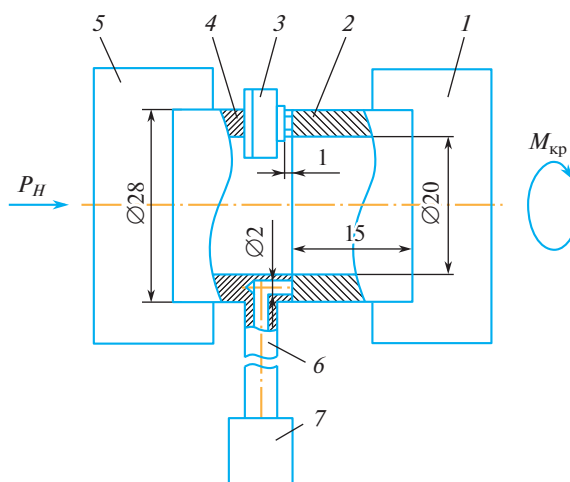


Рис. 2. Схема расположения образцов и датчиков: 1 – вращающийся патрон УМТ; 2 – вращающийся образец, нержавеющая сталь; 3 – инфракрасный датчик температуры MLX90614; 4 – неподвижный образец, латунь; 5 – неподвижный патрон УМТ; 6 – трубка для измерения давления смазки; 7 – датчик давления смазки.



Рис. 3. Система сбора данных.

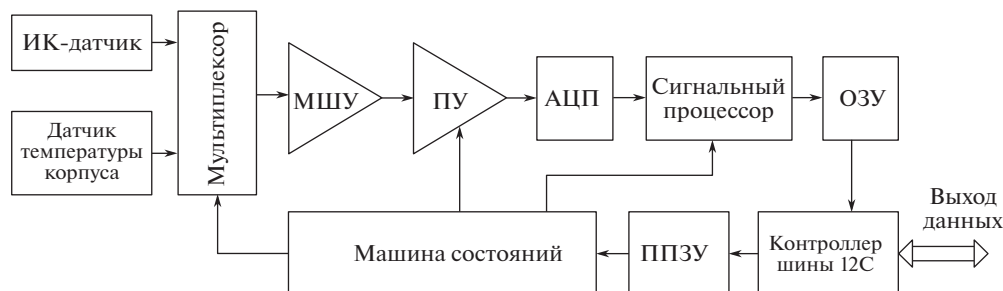


Рис. 4. Блок-схема измерителя температуры: МШУ – малошумящий усилитель; ПУ – усилитель с программируемым коэффициентом усиления; АЦП – аналого-цифровой преобразователь; ППЗУ – перепрограммируемое постоянное запоминающее устройство; ОЗУ – оперативное запоминающее устройство.

MLX90614 с оптической системой. Блок-схема измерителя температуры приведена на рис. 4.

Бесконтактный измеритель температуры содержит два датчика: инфракрасный датчик теплового излучения (полупроводниковый болометр) и датчик температуры корпуса (терморезистор).

Работа измерителя контролируется внутренней машиной состояния реализованной по принципу конечного автомата, которая управляет процессом измерения и расчетами температуры объекта и корпуса, а также выполняет постобработку температур для вывода их через цифровой интерфейс I2C. Выходной сигнал ИК-датчика усиливается малошумящим усилителем и усилителем с программируемым коэффициентом усиления, преобразуется в сигма-дельта аналого-цифровым преобразователем и подается на сигнальный процессор для дальнейшей обработки. Сигнал обрабатывается программируемыми фильтрами нижних и верхних частот для дальнейшего уменьшения ширины полосы входного сигнала для достижения минимального уровня шума и заданной частоты обновления. На основании результатов измерений рассчитываются соответствующая температура корпуса прибора и температура объекта.

Оптическая система измерителя температуры показана на рис. 5 и состоит из линзы 1, фокусирующей тепловое излучение на инфракрасном датчике 3, и диафрагмы 2, формирующей диаграмму направленности. На одном основании с инфракрасным датчиком размещен датчик температуры корпуса 4.

Испытание смазочного материала проводилось при нагрузках 200 и 500 Н, с частотой вращения 100, 500, 1000 об/мин. Показания считывались и записывались в память с периодом 0.01 с.

Для каждого режима длительность испытания составляла 5 минут. Измерения проводились в интервале 1 мин в конце испытания (табл. 1). Частота вращения образца n составляла 100, 500, 1000 об/мин.

Коэффициент трения определялся по измеренному моменту трения и приложенной нагрузке. Силу трения рассчитывали по среднему диаметру образца 24 мм. Таким образом, коэффициент трения равен: $k = \frac{M \times 2 \times 1000}{24N}$, где M – момент трения, Н · м; N – нагрузка, Н. Площадь кольцевого образца A с наружным диаметром 28 мм и внутренним диаметром 20 мм составляет $3 \times 10^{-4} \text{ м}^2$.

Теплофизические свойства неподвижного образца, изготовленного из латуни ЛС-59 составляют [12]: теплопроводность $\lambda_1 = 22.68 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot ^\circ\text{C}}$, произведение теплоемкости и

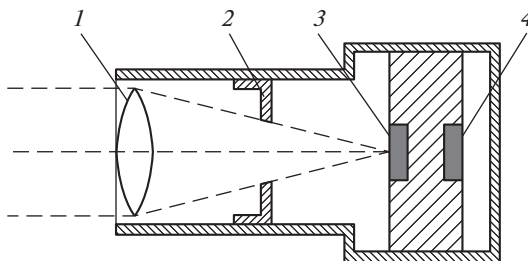


Рис. 5. Оптическая система измерителя температуры. Обозначения на рисунке: 1 – линза; 2 – диафрагма; 3 – инфракрасный датчик; 4 – датчик температуры корпуса.

плотности $c_1\rho_1 = 4.536 \times 10^6 \frac{\text{Дж}}{\text{м}^3 \text{ } ^\circ\text{C}}$, вращающегося образца изготовленного из коррозионно-стойкой стали 12Х18Н10Т: $\lambda_2 = 126.84 \frac{\text{Вт}}{\text{м } ^\circ\text{C}}$, $c_2\rho_2 = 4.074 \times 10^6 \frac{\text{Дж}}{\text{м}^3 \text{ } ^\circ\text{C}}$.

Для вычисления температуры нагрева смазочного слоя выведена формула

$$\theta = \frac{fNV\sqrt{t}}{1.73A(\sqrt{\lambda_1 C_1 \rho_1} + \sqrt{\lambda_2 C_2 \rho_2})}, \quad (1)$$

где θ – температура, $^\circ\text{C}$; f – коэффициент трения; N – нормальная нагрузка, Н; V – линейная скорость вращающегося образца, м/с; t – время, с.

Таблица 1. Экспериментальные данные измерения температуры смазочного слоя

№	Нагрузка, Н	Частота вращения, об/мин	Момент трения по динамометру, Н · м	Температура по ИК-датчику, $^\circ\text{C}$
1	200	100	0.60	30.5
2	200	500	0.36	38.6
3	200	1000	0.32	59.0
4	500	100	0.73	48.0
5	500	500	0.41	138.0
6	500	1000	0.28	210.0

Таблица 2. Расчетные данные изменения температуры смазочного слоя

№	Нагрузка, Н	Частота вращения, об/мин	Линейная скорость вращающейся поверхности, м/с	Коэффициент трения	Температура смазочного слоя с учетом комнатной температуры, $^\circ\text{C}$
1	200	100	0.125	0.250	26.345
2	200	500	0.628	0.150	39.125
3	200	1000	1.250	0.133	53.754
4	500	100	0.125	0.122	27.741
5	500	500	0.628	0.068	41.675
6	500	1000	1.250	0.047	49.820

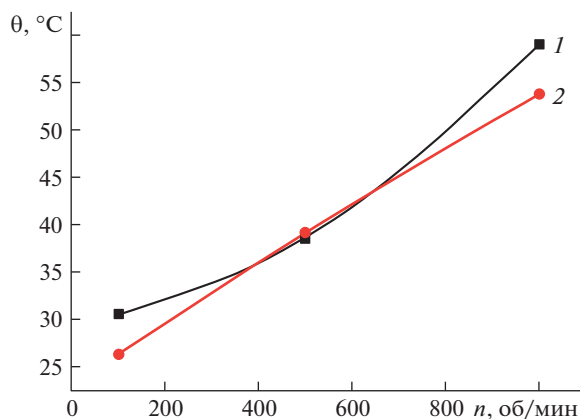


Рис. 6. Зависимость температуры смазочного слоя от частоты вращения при постоянной нагрузке 200 Н: 1 – экспериментальные исследования; 2 – теоретические исследования.

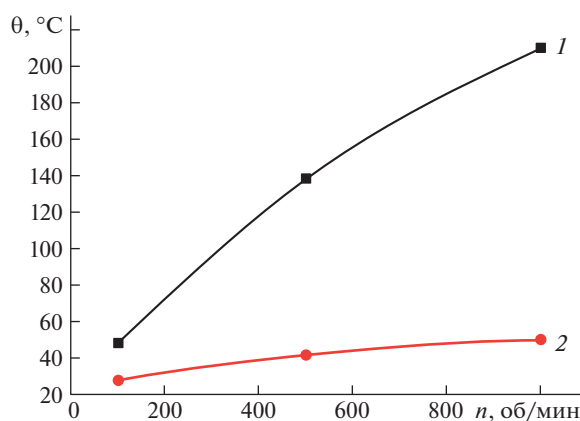


Рис. 7. Зависимость температуры смазочного слоя от частоты вращения при постоянной нагрузке 500 Н: 1 – экспериментальные исследования; 2 – теоретические исследования.

В табл. 2 показано изменение температуры смазочного слоя между сопряженными поверхностями в зависимости от коэффициента трения и теплофизических свойств металлов при линейной скорости вращения (0.125; 0.628 и 1.25 м/с).

По результатам исследования (рис. 6, 7) с увеличением частоты вращения от 100 до 1000 об/мин температура смазочного слоя возрастает от 30 до 210°C (является закономерным).

Как видно из полученных данных (рис. 7), при нагрузке 500 Н экспериментальные значения сильно отличаются от теоретических.

Корреляция экспериментальных и расчетных данных наблюдается при нормальной нагрузке 200 Н и нарушается при нагрузке 500 Н. Из этого следует, что данная формула применима для расчета при нагрузке 200 Н, а при нагрузке 500 Н она нуждается в дальнейшей корректировке, связанной с учетом температуры смазочного слоя во вре-

мени и распределением тепловых потоков между смазкой и металлическими образцами.

Выводы. Из анализа экспериментальных данных следует, что температура нагрева смазочного слоя между трущимися поверхностями увеличивается с ростом нормальной нагрузки и частоты вращения образца. Предложен аналитический метод расчета температуры смазочного слоя между трущимися поверхностями. В результате сравнения теоретических и экспериментальных данных температуры нагрева смазочного слоя установлено их соответствие при нагрузке 200 Н.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Трение, изнашивание и смазка: Справочник / Под общ. ред. И.В. Крагельского, В.В. Алисина. В 2 т. Т. 1. М.: Машиностроение, 1978.
2. Чичинадзе А.В. Трение, износ и смазка (трибология и триботехника). М.: Машиностроение, 2003. 576 с.
3. Persson B.N.J., Tosatti E. Physics of Sliding friction. Kluwer, Dordrecht 1996, 460 p.
4. Чичинадзе А.В., Берлинер Э.М., Браун Э.Д. Трение, износ и смазка. Трибология и триботехника / Под ред. А.В. Чичинадзе. М.: Машиностроение, 2003. 576 с.
5. Bowden F.P., Tabor D. The Friction and Lubrication of Solids. Oxford: Clarendon Press, 2001.
6. Persson B.N.J. Sliding Friction. Physical Principles and Applications. Springer, 2002.
7. Rabinowicz E. Friction and wear of materials. 2nd ed. John Wiley & Sons, inc., 1995. 315 p.
8. Мышкин Н.К., Петроковец М.И. Трение, износ, смазка. Физические основы и технические приложения трибологии. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. 368 с.
9. Попов В.А., Попов В.Л. Механика контактного взаимодействия и физика трения: от нанотрибологии до динамики землетрясений. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2013. 350 с.
10. Резников А.Н. Тепловые процессы в технологических системах. М.: Машиностроение, 1990. 288 с.
11. Справочник по триботехнике / Под общ. ред. М. Хедбы, А.В. Чичинадзе. В 3 т. Т. 1. Теоретические основы. М.: Машиностроение, 1989.
12. Albagachiev A.Yu., Novikova N.N., Tokhmetova A.B. Tribotechnical Characteristics of Nanomodifier 1 // J. of Machinery Manufacture and Reliability. 2020. V. 49 (5). P. 457.